

РАСПОЗНАВАНИЕ ВИДА МОДУЛЯЦИИ ИМПУЛЬСНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ В СРЕДСТВАХ РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Царик Дмитрий Владимирович

Директор по созданию средств радиопеленгования,
ООО «Специальный технологический центр», г. Санкт-Петербург
dvtzar@gmail.com

RECOGNITION OF THE TYPE OF MODULATION OF THE PULSE SEQUENCE IN THE MEANS OF RADIO ENGINEERING CONTROL

D. Tsarik

Summary. An improved algorithm for recognizing the type of modulation of the pulse sequence in radio engineering control (RTC) is proposed, based on the selection of a set of informative features from the input radio signal, which characterizes the law of change in the pulse repetition intervals. The algorithm includes two stages: dividing the input radio signal into categories and deciding on the type of modulation in a certain space of informative features, which makes it possible to generally take into account the uncertainty of the input information and identify multifunctional radiation sources with a pulse repetition period (PRP) that varies in time randomly. It is shown that the proposed features provide recognition of the type of PTP modulation under conditions of distortion of the original sample by random disturbances.

Keywords: radio engineering control, recognition of the type of pulse sequence modulation, radar systems.

Аннотация. Предложен усовершенствованный алгоритм распознавания вида модуляции импульсной последовательности в средствах радиотехнического контроля (РТК), основанный на выделении из входного радиосигнала набора информативных признаков, характеризующий закон изменения интервалов следования импульсов. Алгоритм включает в себя два этапа: разделение входного радиосигнала на категории и принятие решение о виде модуляции в определенном пространстве информативных признаков, что позволяет в целом учитывать неопределенность входной информации и выявлять multifunctional источники излучения с периодом повторения импульсов (ППИ), изменяемым во времени случайным образом. Показано, что предложенные признаки обеспечивают распознавание вида модуляции ППИ в условиях искажения исходной выборки случайными возмущениями.

Ключевые слова: радиотехнический контроль, распознавание вида модуляции импульсной последовательности, радиолокационные системы.

Введение

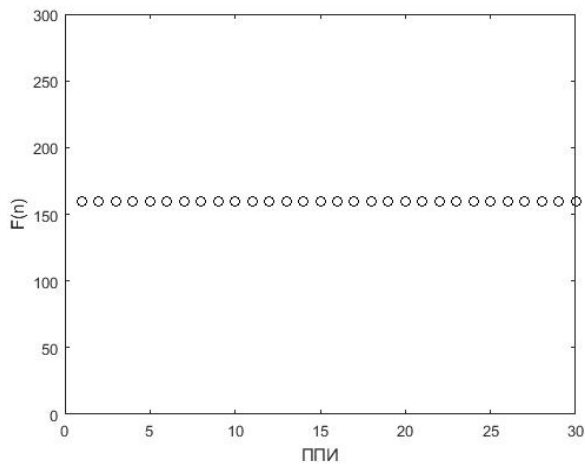
В последние годы наметилась устойчивая тенденция по созданию multifunctional радиолокационных систем (РЛС) как военного так и гражданского назначения, обеспечивающие выполнение одновременно нескольких задач путем использования сложных, динамически изменяемых по программе излучений [10, с.228]. Данное обстоятельство представляет одну из проблем для радиотехнических средств, осуществляющие их распознавания (определения типа РЛС).

Из всех анализируемых параметров наибольшую информативность в смысле определения типа РЛС имеет закон изменения ППИ (вид модуляции импульсной последовательности) $F(n)$.

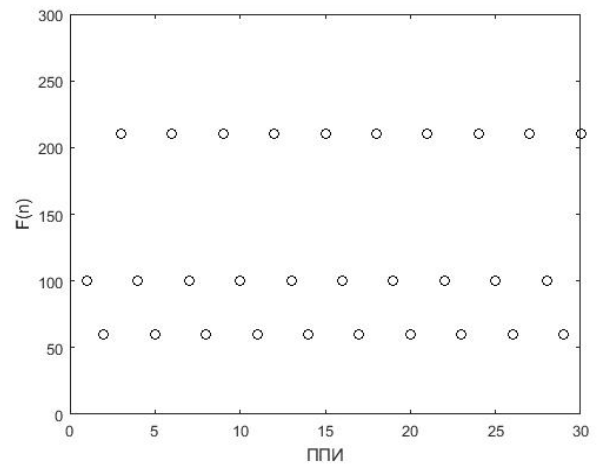
Известные методы распознавания вида модуляции основаны на использовании гистограммы разностей

времен прихода импульсов (ВПИ) [1], и так называемой гистограммы Нельсона [8, 10]. Главным недостатком техники гистограммного анализа является сильная зависимость формы гистограммы от числа анализируемых импульсов и уровня перемешивания последовательностей принадлежащих разным РЛС. Предложенный в [1, 8] подход основывается на обнаружении пика гистограммы, представляющего собой частоту присутствия определенных интервалов в исходной последовательности. Принятие решения происходит путем сравнения пика с заданным порогом. Имеется модификация алгоритма построения гистограммы разностей ВПИ [3]. Суть модификации заключается в последовательном построении многоуровневой гистограммы d -го порядка, т.е. частот появления следующих интервалов $x_k^{(d)} = t_{k+d} - t_k, k = 1, 2, \dots, N - d$.

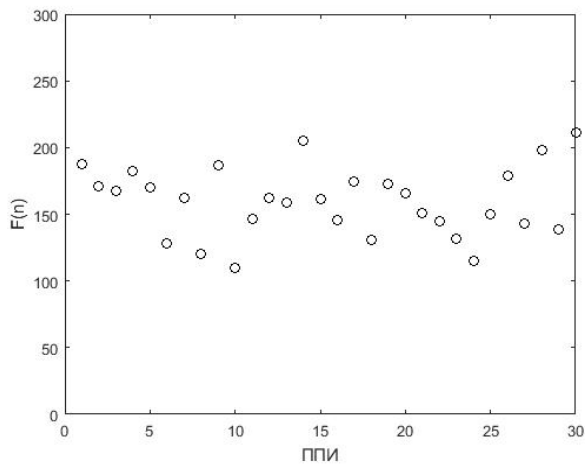
Основное ограничение метода обнаружения последовательности по гистограмме, что он главным образом, предназначен для распознавания простых после-



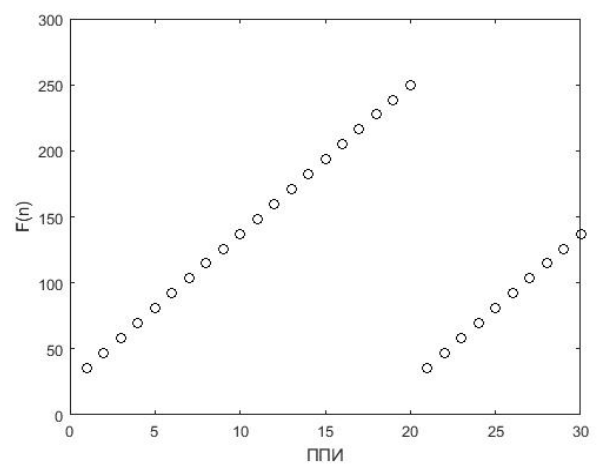
а)



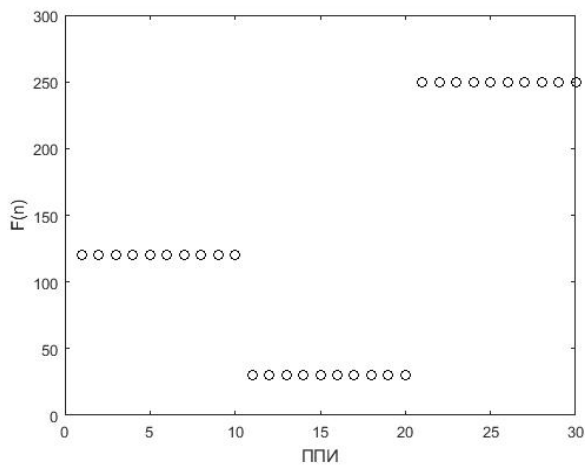
б)



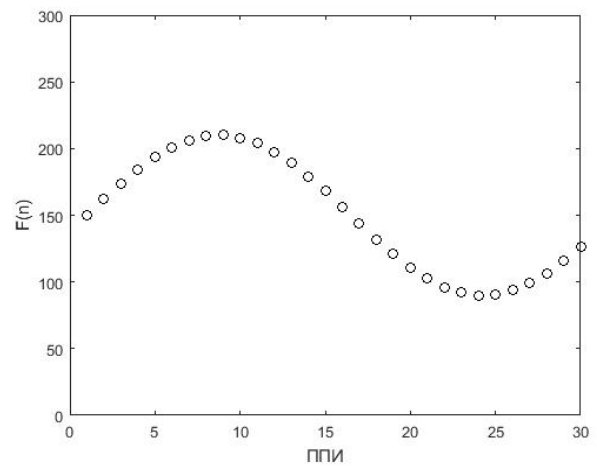
в)



г)



д)



е)

Рис. 1. Основные виды (классы) межимпульсной модуляции: а) Const-ППИ; б) Stagger-ППИ; в) Jitter-ППИ; г) Sliding-ППИ; д) D&S-ППИ; е) Periodic-ППИ

довательностей и не учитывает более сложные виды модуляций. Вторым недостатком — требование выбора порога, который сильно зависит от числа дефектов (возмущений) в исходном сигнале (пропуски отдельных импульсов и наличие ложных).

Для преодоления недостатков присущих методу гистограммы были предложены подходы, основанные на учете порядковой информации о межимпульсных интервалах. Так в [4, 7] используется автокорреляционный способ выделения признаков для распознавания отдельных видов модуляции. Однако, вследствие чувствительности признаков к наличию дефектов в анализируемой последовательности, операция выделения признаков должна предшествовать операции устранения дефектов. На практике это не всегда удается сделать. В работе [5] для решения задачи распознавания вида модуляции предложено использовать N размерный вектор разностей ВПИ. Главный недостаток данного описания, что оно не инвариантно к изменению параметров модуляции ППИ. Более гибкая модель описания приведена в [6]. Здесь уменьшено число признаков до двух. Показано, что они обеспечивают лучшую достоверность распознавания в сложной радиоэлектронной обстановке (РЭО), но их различительные способности все еще ограничены.

Цель статьи — разработка усовершенствованного алгоритма распознавания вида модуляции импульсной последовательности, отличающегося большей достоверностью в условиях приема искаженных излучений и неоднозначных измерений, вызванных случайным пропаданием или появлением ложных импульсов, а также динамично изменяющейся РЭО.

Виды функциональной зависимости между интервалами следования импульсов. В общем случае закон модуляции $F(n)$ может быть описан следующим образом

$$F(n) = t_{n+1} - t_n = x(n), \quad n = 1, 2, \dots, N - 1, \quad (1)$$

где t_n — время прихода n -го импульса, $x(n)$ — n -ый межимпульсный интервал, N — число импульсов в анализируемой последовательности.

Проведенный в [2, с.23–35] анализ сигналов современных РЛС позволил выделить три наиболее часто используемых класса излучений с модуляцией по ППИ: простой (Const-ППИ), регулярный (Stagger-ППИ) и вобулирующие (в том числе по случайному закону): Jitter-ППИ, D&S-ППИ, Sliding-ППИ, Periodic-ППИ. Ниже приведены формулы, описывающие, упомянутые классы:

$$\text{Const-ППИ: } F(n) = \text{ППИ}_0 + \delta_c(n),$$

$$\text{Jitter-ППИ: } F(n) = \text{ППИ}_0 + \delta_j(n),$$

$$\text{D\&S-ППИ: } F(n) = \begin{cases} \text{ППИ}_1 & n = 1, 2, \dots, N_1 \\ \text{ППИ}_2 & n = N_1 + 1, \dots, N_1 + N_2 \\ \dots & \dots \\ \text{ППИ}_m & n = N_{m-1} + 1, \dots, N_{m-1} + N_m \end{cases},$$

$$\text{Sliding-ППИ: } F(n) = \text{ППИ}_{\min} + k \cdot [(n-1) \bmod M], \quad n = 1, 2, \dots, N,$$

$$\text{Periodic-ППИ: } F(n) = \text{ППИ}_0 + A \sin(\omega n + \varphi),$$

$$\text{Stagger-ППИ: } F(i + k_s M_s) = F(i), \quad i = 1, 2, \dots, M_s, \quad k_s = 1, 2, \dots, T, \quad N = M_s T,$$

где ППИ_0 — среднее значение периода повторения импульсов, δ_c, δ_j — величина вобуляции ППИ относительно среднего значения, m — число пачек импульсов в последовательности, N — число импульсов в последовательности, N_1, \dots, N_m — число импульсов в соответствующей пачке данной последовательности, $\text{ППИ}_1, \dots, \text{ППИ}_m$ — период повторения импульсов в пачке $1, \dots, m$ соответственно, k — коэффициент, характеризующий наклон (скорость) функции монотонного возрастания или убывания интервалов следования импульсов от начального значения $\text{ППИ}_{\min} M$ — число импульсов на интервале возрастания (убывания) ППИ, A — амплитуда модуляции, ω, φ — частота и фаза модуляции, M_s — число интервалов на одном определенном периоде (фрейме), T — число фреймов в последовательности.

Примеры функциональной зависимости между интервалами следования импульсов сигналов РЛС приведены на рисунке 1.

Как видно из рисунка 1 для каждого вида межимпульсной модуляции характерны свои особенности. При постоянной (Const-ППИ) пиковые значения ППИ составляют не более 1% от его среднего значения, напротив, при случайной модуляции (класс Jitter-ППИ) они могут достигать 30%.

В последовательности с D&S-ППИ имеются m четко выраженных промежутков (пачек импульсов) с постоянными ППИ, причем ППИ от пачки к пачки переключается на другое значения из заданного списка, образуя тем самым повторяющиеся кадры (фреймы).

Последовательность с Stagger-ППИ использует два и более интервалов, выбираемых из определенного списка и которые повторяются через период, равный сумме используемых интервалов. Число интервалов, образующих один период (фрейм) может достигать 32. Отметим, что отдельные интервалы могут появляться более, чем один раз за период.

Последовательность с монотонным изменением ППИ (Sliding-ППИ) характеризуется монотонным уве-

личением или уменьшением следующих друг за другом интервалов в заданных пределах. Данный вид модуляции, как правило, имеет периодическую структуру, т.е. после достижения одной границы диапазона изменения интервала происходит переход к другой.

Последовательность с изменением ППИ по синусоидальному или треугольному закону (Periodic-ППИ) характеризуется большим, по сравнению с Sliding-ППИ сигналом, периодом вобуляции. Он имеет, как правило, небольшой диапазон изменения ППИ (5% от среднего значения) на интервале (периоде) примерно равным 200 мс.

Описанные выше особенности будут положены в основу построения набора признаков при описании функции $F(n)$.

Признаки для описания вида модуляции ППИ. Выделение признаков является одной из основных задач при распознавании типа РЛС, поскольку от нее зависит точность и достоверность принятия решения. Вследствие уникальности характеристик закона модуляции, их информативность может быть потеряна на этапе предварительной обработки. Задача состоит в том, чтобы описать анализируемую последовательность исключив потерю информации перед этапом распознавания. Признаки для распознавания должны быть толерантными к большому числу дефектов в анализируемой последовательности, включая неточности в измерение времени прихода импульсов. Кроме того признаки должны быть робастными к вариациям параметров модуляции ППИ.

На основе анализа существующих подходов к описанию вида модуляции ППИ выбраны две группы признаков, получаемые на базе гистограмм [1, 8] и разностей ППИ 1-го порядка [3].

Вид функции $F(n)$ для регулярных последовательностей вида Const и Stagger будем описывать с использованием первой группы признаков (f_1, f_2), а для Jitter, D&S, Sliding и Periodic последовательностей с использованием второй группы (f_3, f_4, f_5).

Первый признак f_1 представим как значение максимального пика гистограммы, вычисляемой как

$$f_1 = n^{\max}, \quad (2)$$

где n^{\max} — максимальное значение n -го разряда данной гистограммы.

Величина f_1 порядка T/n указывает на последовательность вида Const или Stagger, где T — ППИ.

Известно, что для обнаружения Stagger сигнала с использованием гистограммы разностей ВПИ требуется выделить M непересекающихся во времени последовательностей с одинаковыми значениями ППИ, составляющих фрейм (период вобуляции) сигнала [3]. Учитывая это, второй признак определим следующим образом

$$u_d = n_d^{\max} / (N - d - 1) \quad (3)$$

где n_d^{\max} — наивысший пик на гистограмме разностей ВПИ. Так как, число позиций в сигнале с модуляцией вида Stagger в общем неизвестно, необходимо вычислить значение u_d для нескольких уровней гистограммы и определить максимум. Второй признак представим так

$$f_2 = \max(u_d), \quad d = 1, 2, 3, \dots, D_{\max}, \quad (4)$$

где D_{\max} — выбирается в соответствии с предположением о наибольшем числе позиций в сигнале с модуляцией вида Stagger.

Здесь число уровней есть ни что иное как число интервалов, повторяющихся через время t , равное их сумме и которое является признаком данного вида последовательности.

Для описания признаков второй группы f_3, f_5 введем в рассмотрение разности ППИ первого порядка вида

$$D(n) = F(n+1) - F(n). \quad (5)$$

Здесь, как и ранее

$$F(n) = t_{n+1} - t_n = x(n), \quad n = 1, 2, \dots, N - 1,$$

t_n — время прихода n -го импульса, $x(n)$ — n -ый межимпульсный интервал, N — число импульсов в анализируемой последовательности.

Третий признак f_3 . Из рисунка 1в видно, что последовательность с Jitter-ППИ имеет наибольшее количество локальных максимумов и отличается от других видов модуляции сложностью структуры. Учитывая это признак для данного вида модуляции можно описать так

$$f_3 = \frac{\text{Num}(D(n) \cdot D(n+1) < 0)}{N - 1}, \quad (6)$$

где Num(\cdot) — обозначает число раз, при котором выполняется условие в круглых скобках.

Четвертый признак f_4 . Ранее было отмечено, что значение интервала следования импульсов в последова-

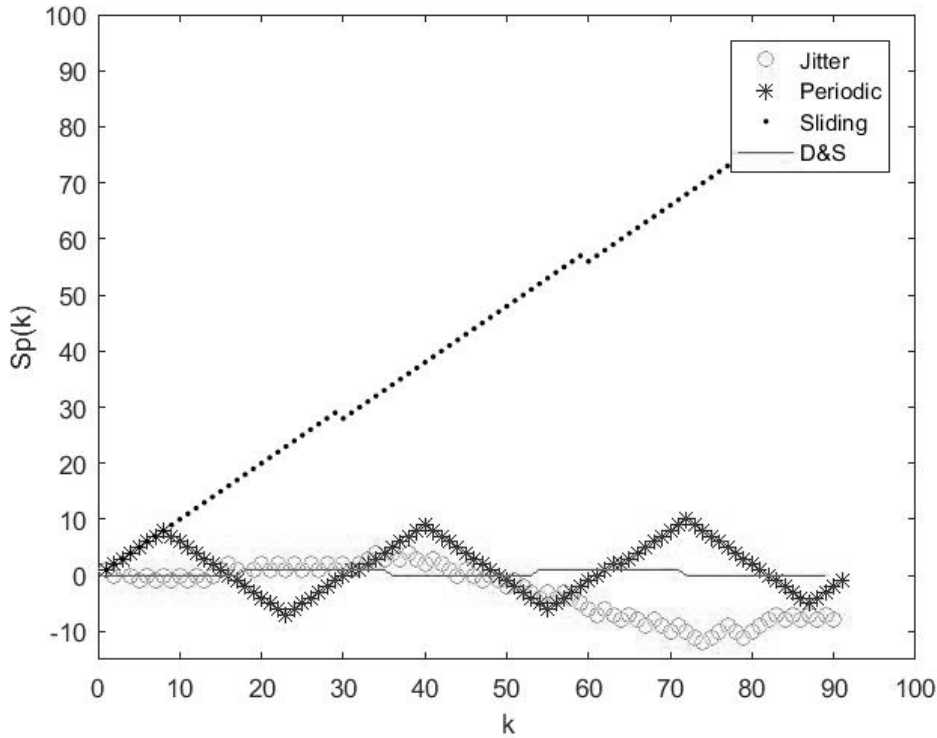


Рис. 2. Внешний вид кривой Sp(k)

тельности с D&S-модуляцией изменяется только при переключении на режим излучения новой пачки импульсов, тогда как последовательности с другими видами модуляции перестраивают ППИ непрерывно в дискретные моменты времени. Поэтому если вычислить разности вида (5), то в образовавшемся ряду значений $D(n)$ будут только несколько ненулевых элементов для последовательности с D&S-модуляцией в отличие от других. Данную особенность можно выразить в виде следующей формулы

$$f_4 = \sum_{n=1}^{N-1} s^2(n) / (N-1) \tag{7}$$

где $s_\varepsilon(x)$ — сигнум-функция, определяемая как

$$s_\varepsilon(x) = \begin{cases} -1, & \text{при } x < -\varepsilon \\ 0, & \text{при } |x| \leq \varepsilon \\ 1, & \text{при } x > \varepsilon \end{cases} \tag{8}$$

ε — малая величина порядка 10–100 нс, задающая границу стабильного интервала

Пятый признак f_5 . Пусть определена функция вида

$$Sp(k) = \sum_{n=1}^k s(n) / (N-1), \quad k = 1, 2, \dots, N-1. \tag{9}$$

Построим график данной функции для последовательностей с рассматриваемыми видами модуляции. Результат показан на рисунке 2

Как следует из рисунка 2, форма кривой для последовательности с Sliding-модуляцией близка к диагональной линии, тогда как кривые с другими модуляциями имеют форму горизонтальной (с небольшими отклонениями от оси абсцисс) линии. Данную особенность можно описать с помощью следующего признака

$$f_5 = \frac{\left| \sum_{k=1}^{N-1} Sp(k)t(k) \right|}{\sum_{k=1}^{N-1} t^2(k)}, \quad t(k) = \begin{cases} k, & k \geq 0 \\ 0, & k < 0 \end{cases} \tag{10}$$

Здесь $t(k)$ — линейно нарастающая функция. Поскольку кривая Sp для модуляции вида Sliding имеет наибольшую степень подобия к функции $t(k)$, то значение f_5 близко к единице, а для других видов модуляции f_5 — малая величина. Таким образом, данный признак позволяет отличить последовательность с Sliding-ППИ от последовательности с Periodic-ППИ.

Путем проведения имитационного моделирование в среде Matlab установлены диапазоны значений пред-

Таблица 1. Диапазоны значений признаков f_3 - f_4

Признак	Значение	Вид модуляции по ППИ
f_3	0.6–0.8	Jittered-ППИ
f_4	0.1–0.4	Dwell&Switch-ППИ
f_5	0.7–0.9	Sliding-ППИ
f_5	0.1–0.4	Periodic-ППИ

Таблица 2. Параметры моделируемых последовательностей

№	Вид вобуляции	Амплитуда вобуляции относительно среднего значения	Примечание
1	Jitter-ППИ	5–30%	Закон изменения ППИ: Гаусса, равномерный
2	D&S-ППИ	5–30%	Число импульсов в пачке 10–50
3	Sliding-ППИ	30–80%	Число интервалов на период вобуляции: 10–30
4	Periodic-ППИ	5–30%	Число интервалов на период вобуляции: 20–50

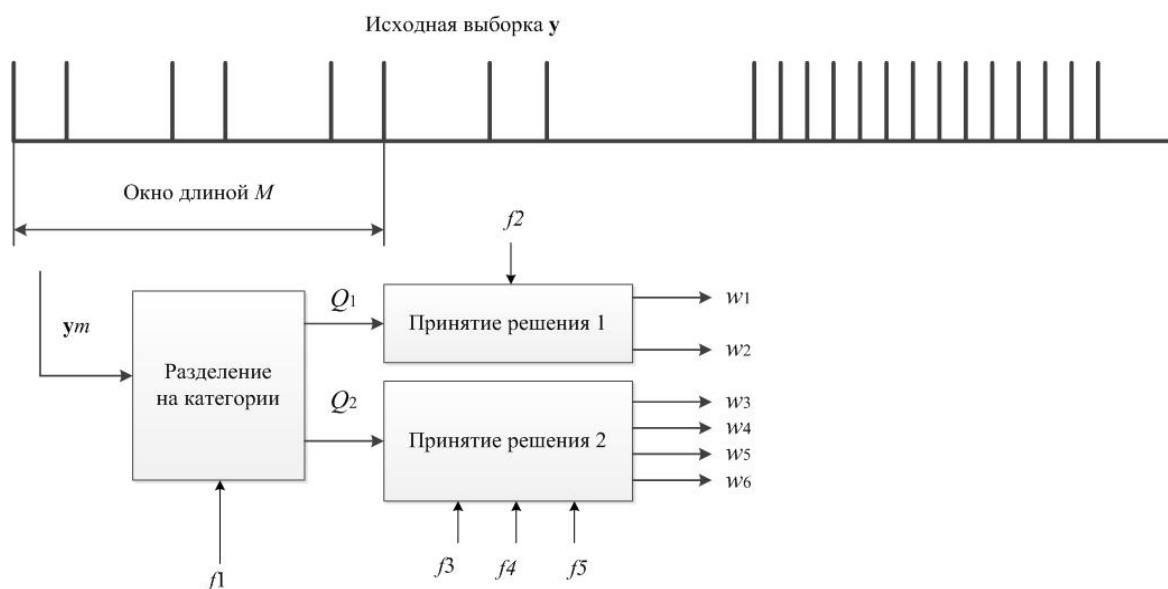


Рис. 3. Обобщенная структурная схема распознавания вида модуляции импульсной последовательности

ложенных признаков для сигналов РЛС с разными видами модуляции, таблица 1.

Параметры моделируемых последовательностей приведены в таблице 2.

Как видно из таблицы 1 предложенные признаки обеспечивают межклассовую различимость и компактность схожих между собой последовательностей с соответствующими видами модуляции по ППИ.

Описание алгоритма распознавание вида модуляции импульсных последовательностей. Алгоритм

распознавание основан на использование «окна обработки» — одномерной области, охватывающей конечное множество отсчетов ВПИ исходной выборки y . В процессе обработки это окно смещается по выборке, т.е. является «скользящим». Для каждого n -положения окна по содержащимся в нем входным отсчетам y_n принимается решение о виде модуляции ППИ. Принятие решение осуществляется в два этапа, включающее в себя грубое и точное распознавание, рисунок 3.

На первом этапе осуществляется обнаружение в исходной выборке последовательности, принадлежащей к одной из двух категорий с использованием признака

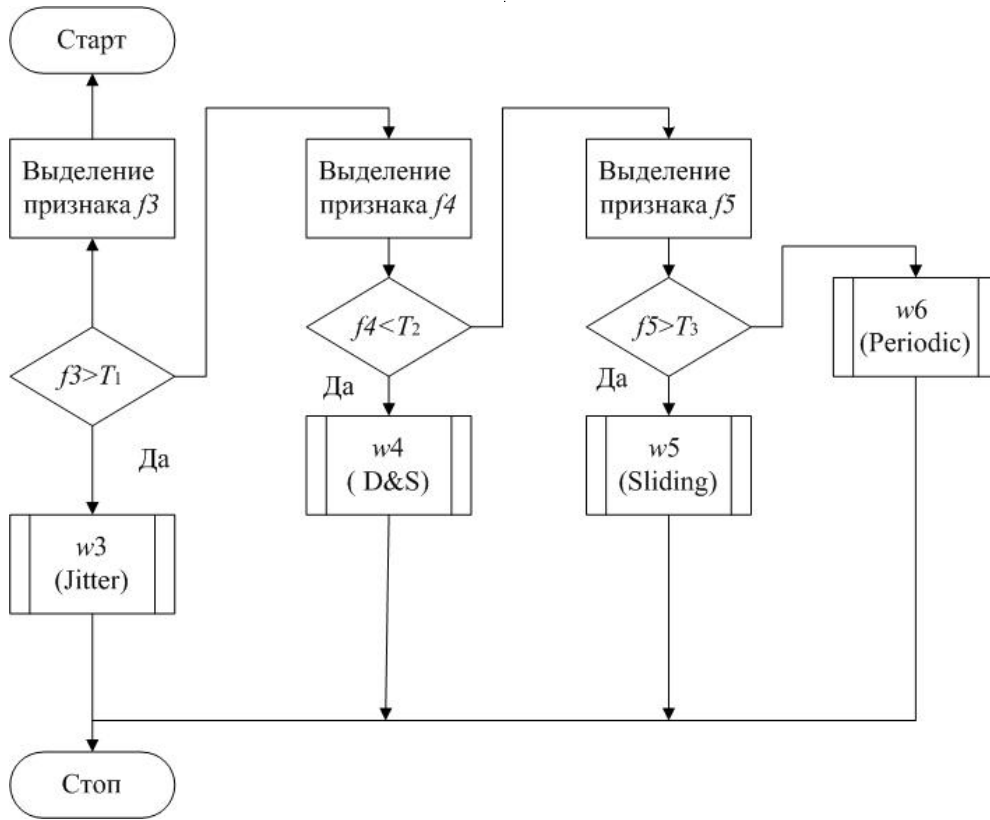


Рис. 4. Алгоритм распознавания вида модуляции на основе признаков f_3, f_4, f_5

f_i : категория 1 (Const, Stagger); категория 2 (Jitter, Sliding, D&S, Periodic). Обозначим соответствующие категории в соответствие с их индексами как

$$\theta_i, \quad i \in \{1, 2\}.$$

На втором этапе принимается решение о принадлежности анализируемой импульсной последовательности к одному из шести видов модуляции ППИ:

$$w_i, \quad i \in \{1, 2, \dots, 6\} \equiv$$

$$\equiv \{\text{Const, Stagger, Jitter, Sliding, D\&S, Periodic}\}.$$

При этом, если на первом этапе выявлена категория Q_i решение принимается на основе признака f_2 , в противном случае применяются признаки f_3-f_5 .

Двухэтапная схема распознавания по сути уменьшает размерность пространства решений до двух классов, каждый из которых включает в себя два и четыре подкласса соответственно.

Разделение исходной выборки y_n на категории проводится путем сравнения признака f_i с порогом T_a по правилу

" $y_n \in Q_1$, если $f_i > T_a$, иначе — $y_n \in Q_2$ ".

Порог T_a определяется по формуле

$$\Phi(\tau) = \alpha \frac{T_i}{\tau},$$

где T_n — интервал наблюдения исходной выборки (сигнала), τ — значение разряда гистограммы, α — настраиваемый параметр.

Окончательное принятие решение проводится на втором этапе с использованием признаков f_2 или f_3-f_5 .

В первом случае вид модуляции определяется согласно правилу:

"если $f_2 > T_b$ то w_2 (Stagger) иначе w_1 (Const)". Порог T_b может быть найден на базе функции вида [1]

$$\Phi(\tau) = \beta(N - q) e^{-\tau/gn_{At}}, \quad (11)$$

где N — число наблюдаемых импульсов; β — константа, ($\beta < 1$); n_{At} — общее число элементарных ячеек (разрядов) гистограммы; τ — размер элементарной ячейки гистограммы; q —уровень гистограммы; g — константа меньше единицы.

Таблица 3. Сравнительная характеристика усовершенствованного алгоритма

Число потерянных импульсов, %	0	5	15	25
Предложенный алгоритм	100	100	99.4	96.3
Известный [3]	90.3	89.1	85.7	78.2

Значения β и g находятся опытным путем. Отметим, что здесь величина β задает предполагаемый процент потерянных импульсов.

Принятие решение с использованием признаков f_3 - f_5 проводится согласно алгоритму, показанному на рисунке 4.

Его суть заключается в последовательном сравнении признаков f_3, f_4, f_5 с определенными порогами T_1, T_2, T_3 , (см. таблицу 1).

Оценка достоверности распознавания проводилась при разном числе R ложных импульсов в анализируемых последовательностях. Данная величина, равная отношению (в процентах) числа ложных импульсов к общему числу изменялась от 0% до 25% с шагом 5%. С целью исключения влияния случайных факторов для каждого значения R , используя метод Монте-Карло, проведено 200 экспериментов. Показано, что число ложных в смеси импульсов существенно не влияет на достоверность распознавания при R от 0 до 25%.

Аналогично была проведена оценка влияния на достоверность распознавания числа V пропущенных в смеси импульсов. Величина V , также изменялась от 0 до 25% с шагом 5%.

Выявлено, что число правильных решений уменьшается с ростом V , но оно всегда больше 96%.

И в заключении был проведен эксперимент, описывающий качество разработанного алгоритма при условии наличия в смеси ложных импульсов, и отсутствия истинных.

Установлено, что в условиях сложных возмущающих факторов, качество распознавания может уменьшиться до 92%.

В таблице 3 приведена обобщенная характеристика исследуемого алгоритма при разных значениях V .

Здесь же, для сравнения, показана оценка качества известного алгоритма [3].

Из данной таблицы видно преимущество использования предложенных признаков для распознавания вида модуляции импульсных последовательностей.

Таким образом, рассмотренный алгоритм распознавания вида модуляции ППИ обеспечивает достоверное решение данной задачи в условиях изменения во времени закона модуляции и искажения исходной выборки случайными возмущениями.

ЛИТЕРАТУРА

- Mardia H.K. New Techniques for The Deinterleaving of Repetitive Sequences // IEE Proc. F-Radar and Signal Processing. 1989. Vol. 136, № 4. P. 149–154.
- Терентьев А.В., Коротков В.Ф. Радиотехническая разведка: Теория и практика обработки радиолокационных сигналов. СПб.: Медиапир, 2021, 345 с.
- Коротков В.Ф., Зырянов П.С. Разделение импульсных последовательностей в смешанном потоке сигналов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 3. С. 5–10.
- 93 Ryoo, Y. — J., Song, K. — H., & Kim, W. — W. (2007). Recognition of PRI modulation types of radar signals using the autocorrelation. IEICE Transactions on Communications, E90-B (5), 1290–1294.
- Noone, G. P. (1999). A neural approach to automatic pulse repetition interval modulation recognition. In Proceedings of the information, decision and control conference (pp. 213–218).
- Rong, H., Jin, W., & Zhang, C. (2006). Application of support vector machines to pulse repetition interval modulation recognition. In Proceedings of 6th international conference on ITS telecommunications (pp. 1187–1190).
- Shi, Z.Y., Wu, H., Shen, W.D., et al.: 'Feature extraction for complicated radar PRI modulation modes based on auto-correlation function' (IEEE, Xi'an, China, 2017).
- Nelson D, "Special purpose correlation functions for improved signal detection and parameter estimation", International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, pp.73–76, 1993.
- Balin, M. (1996) IDEA—Interactive deinterleaver for ELINT analysis. In Proceedings of ICSPAT, Oct. 1996, 852–856.
- Справочник по радиолокации / Под ред. М.И. Сколника. Пер. с англ. под общей ред. В.С. Вербы. В 2 книгах. Книга 1. Москва: Техносфера, 2014. — 680 с.